

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka
Petri Virkkala

Opinnäytetyö

Reititys WLAN mesh-verkoissa

Tämä tutkintotyö on jätetty opinnäytteenä tarkistettavaksi
insinöörin tutkintoa varten Tampereella 1.10.2009

Työn ohjaaja koulutuspäällikkö Ari Rantala
Työn tilaaja Nokia Research Center, Mika Kasslin / Demola, Ville Kairamo
Tampere 10/2009

Tampereen ammattikorkeakoulu	i
Tietotekniikan koulutusohjelma	
Tietoliikennetekniikka	
Tekijä	Petri Virkkala
Työn nimi	Reititys WLAN mesh-verkoissa
Sivumäärä	43 sivua
Avainsanat	reititys, langattomat lähiverkot, mesh, tiedonsiirto, protokolla
Valmistumisaika	10/2009

Työnohjaaja	koulutuspäällikkö Ari Rantala
Työn tilaaja	Nokia Research Center, Principal Member of Research Staff Mika Kasslin / Demola, projektipäällikkö Ville Kairamo

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia mesh-verkkoja, sekä niiden reititystä. Mesh-verkossa reititys hoidetaan täysin verkon jäsenten avulla, eikä tukiasemia tarvita lainkaan. Verkon toiminta perustuu automaattisille linkkien luonnille ja niiden ylläpidolle. Mesh-verkkoja tutkitaan kahdelta eri kannalta: avoimeen lähdekoodiin perustuvan open80211s:n avulla, sekä vielä keskeneräisen IEEE 802.11s standardin kautta.

Open80211s mahdollistaa mesh-verkon luomisen, vaikka virallista IEEE 802.11s standardia ei ole vielä työtä kirjoittaessa julkaistu. Työssä esitelty verkon muodostamis- ja palveluesimerkit perustuvat juuri open80211s toteutukseen. Työn varsinainen reititysosuus perustuu suuriltaosin IEEE 802.11s draft versioon (maaliskuu 2009).

Työssä esitellään lyhyesti langattomien verkkojen kehitystä, ja vertaillaan mesh-verkkoa tukiasemasidonnaiseen verkkoon. Lisäksi kerrotaan mesh-verkon muodostamisesta käytännössä sekä protokollatasolla. Reititystä käsitellään Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) protokollan, sekä verkossa käytettävien tietoelementtien kautta.

Työ on tehty osana Demola projektia Power of Mesh, jonka tilaajana oli Nokia Research Center. Projektin tavoitteena oli rakentaa open80211s:n perustuva mesh-verkko, sekä suunnitella ja toteuttaa siihen sovellus joka hyödyntää mesh-verkon ominaisuuksia. Projektiryhmän aikaansaannosta on esitelty liitteessä 1.

TAMK University of Applied Sciences		ii
Computer Systems Engineering		
Telecommunications Engineering and Data Network Systems		
Writer	Petri Virkkala	
Thesis	Routing in WLAN mesh-networks	
Pages	43 pages	
Keywords	routing, wireless networks, mesh, data transfer, protocol	
Graduation time	10/2009	
Thesis supervisor		Head of Degree Programme Ari Rantala
Co-operating company		Nokia Research Center, Principal Member of Research Staff Mika Kasslin / Demola, Project Manager Ville Kairamo
<p>ABSTRACT</p> <p>The purpose of this thesis was to research and introduce the concept of mesh networking and mainly focus on it's routing. The routing in mesh networks is handled fully with mesh stations and traditional access points are not needed. Network is formed automatically by mesh stations which automatically create and maintain links. The concept of mesh is approached with two ways: the open source implementation open80211s and the official IEE 802.11s standard which is yet to be released.</p> <p>Open80211s makes it possible to create a mesh network even though the IEEE 802.11s standard hasn't been released at the time of writing this thesis. The examples about forming mesh networks and using it's services are based on open80211s implementation. The routing part is based mainly on the official IEEE 802.11s draft (March 2009).</p> <p>This thesis introduces the development of wireless networks and compares mesh networking to access point associated networks. In addition, this paper deals with forming mesh networks in practice and from the protocol point of view. The routing section of the text focuses on Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) and on information elements used in mesh networking.</p> <p>This thesis is a part of a Demola project Power of Mesh which was done for Nokia Research Center. The goal of the project was to create an open80211s based mesh network and to design and implement an application which exploits the mesh network. The results of the project are introduced in appendix 1.</p>		

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Demola projekti Power Of Meshin yhteydessä, jonka tilaajana oli Nokia Research Center. Haluan kiittää erityisesti Demolaa – Ville Kairamo - upeasta mahdollisuudesta ja opastuksesta projektissa, sekä Nokia Research Centeriä – Mika Kasslin – tuesta projektin parissa. Kiitokset myös Tampereen ammattikorkeakoululle, työn ohjaajalle koulutuspäällikkö Ari Rantalalle ja tietysti koko projektiryhmälle.

Työtä tehdessä mesh-verkot ovat tekemässä tuloaan viralliseksi standardiksi ja jäämme mielenkiinnolla odottamaan niiden yleistymistä ja saapumista kuluttajamarkkinoille. Toivottavasti projektiryhmämme tekemä työ osoittaa edes osittain mesh-verkoissa olevan potentiaalin.

Tämä tutkintotyö on julkinen (ei salainen).

Tampereella 1.10.2009

Petri Virkkala

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ALKUSANAT.....	iii
SISÄLLYS.....	iv
LYHENTEET JA TERMIT.....	v
1 Johdanto.....	8
2 Langattomat lähiverkot.....	10
2.1 IEEE 802.11 standardit.....	10
2.2 open80211s.....	12
3 Verkon topologia.....	14
3.1 IEEE 802.11 BSS.....	14
3.2 IEEE 802.11s verkko.....	15
4 Verkon muodostus ja palvelut.....	17
4.1 open80211s verkon muodostus	17
4.1.1 Verkon muodostus iw:llä.....	18
4.1.2 Verkon muodostus protokollatasolla.....	20
4.2 Verkon palvelut.....	23
5 Reititys.....	25
5.1 HWMP.....	25
5.1.1 On demand reitinvalinta.....	27
5.1.2 Proactive tree reitinvalinta.....	27
5.2 Tietoelementit.....	28
5.2.1 PREQ elementti.....	28
5.2.2 PREP elementti.....	31
5.2.3 PERR elementti.....	32
5.2.4 RANN elementti.....	33
5.2.5 PANN elementti.....	34
5.2.6 Mesh konfiguraatio elementti.....	35
6 Yhteenveto ja tulevaisuuden pohdinta.....	37
LÄHTEET.....	38
LIITTEET.....	39
Liite 1: Power of Mesh demosovelluksen esittely.....	39

LYHENTEET JA TERMIT

AODV	<i>Ad Hoc On Demand Distance Vector</i> , ad-hoc verkoissa käytettävä reititysprotokolla. HWMP perustuu osittain AODV protokollaan.
AP	<i>Access Point</i> , eli tukiasema. Perinteisesti asema saa yhteyden langattomaan lähiverkkoon tukiaseman kautta. Mesh-verkossa ei tarvita puhtaita tukiasemia.
Avahi	<i>Avahi</i> on Zeroconf sovellus, joka mahdollistaa mm. DNS-palvelut sekä IP-osoitteiden jakamisen. Se myös mahdollistaa verkon palveluiden julkaisemisen sekä etsimisen.
BSS	<i>Basic Service Set</i> , kuvaa yhden langattoman lähiverkon laitteita.
DNS	<i>Domain Name System</i> , tarjoaa IP-osoitteiden rinnalle nimipalvelun esim. internetsivustoille tai verkon laitteille.
DNS-SD	<i>DNS based Service Discovery</i> , on service discovery protokolla joka pohjautuu mDNS:een,
ESS	<i>Extended Service Set</i> , kuvaa BSS:iin liitettyä toista verkkokokonaisuutta.
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> , yleisesti käytössä oleva tiedonsiirtoprotokolla, käyttää TCP protokollaa.
HWMP	<i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i> , mesh-verkkojen käyttämä reitinvalintaprotokolla.
IEEE 802.11	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> on kansainvälinen tekniikan alan järjestö, joka kehittää monien alojen keskeisiä standardeja. IEEE 802.11 standardi kattaa langattomat lähiverkot. IEEE 802.11s on mesh-verkkojen vielä julkaisematon standardi.
IPV4LL	<i>IPV4LL</i> on IPV4-osoitteiden paikalliseen määrittelyyn tehty protokolla.
Kernel	<i>Kernel</i> , eli kerneli on käyttöjärjestelmän ydin.
LLC	<i>Logical Link Control</i> , OSI mallin siirtokerroksessa oleva

tasoa, joka vastaa usean eri protokollan toiminnasta samalla siirtotiellä.

MAC	<i>Media Access Control</i> , OSI mallin siirtokerroksen toinen taso, joka mahdollistaa usean verkon jäsenen kommunikoinnin samassa verkossa.
MBSS	<i>Mesh Basic Service Set</i> , kuvaa yhden mesh-verkon kaikkia laitteita.
mDNS	<i>Multicast DNS</i> , on hajautettu versio DNS protokollasta.
Mesh AP	<i>Mesh Access Point</i> , eli mesh tukiasema. Mesh AP on laite joka sisältää myös mesh STA:n toiminnallisuuden. Mesh AP kytkeytyy verkkoon mesh STA:n avulla. Mesh AP mahdollistaa STA:n liittymisen verkkoon (asemat ilman mesh tukea).
Mesh STA	<i>Mesh Station</i> , eli mesh asema. Mesh STA on mesh-verkon jäsen ja kuuluu MBSS:iin. Mesh STA osaa tarvittaessa reitittää sille tulleen paketin eteenpäin.
open80211s	<i>open80211s</i> on avoimeen lähdekoodiin perustuva toteutus vielä julkaisemattomasta IEEE 802.11s mesh standardista.
OSI malli	<i>Open Systems Interconnection Reference Model</i> kuvaa tiedonsiirtoprotokollia seitsemässä tasossa, joissa jokainen kerros tarjoaa palveluita ylemmälle kerrokselle, ja käyttää alemman kerroksen palveluita.
Portal	<i>Portal</i> , eli portaali mahdollistaa mesh-verkon yhdistämisen toiseen IEEE 802.x verkkoon. Portal on laite joka sisältää myös mesh STA toiminnallisuuden.
STA	<i>Station</i> , eli asema. Langattoman verkon jäsentä kutsutaan usein asemaksi.
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , on tietoliikenneprotokolla, joka tarjoaa luotettavan tiedonsiirron kahden laitteen välille.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , langaton lähiverkko.
Zeroconf	<i>Zeroconf</i> , eli Zero Configuration Networking on protokollajoukko, joka mahdollistaa langattomien laitteiden kytkemisen toisiinsa ilman käyttäjän tekemää konfiguraatiota tarjoamalla laitteille mm. IP-osoitteet sekä DNS nimet.

1 Johdanto

Langattomat lähiverkot ovat jatkuvan kehityksen kohteena, mutta uutta IEEE 802.11s verkkojen standardia on odotettu jo useita vuosia. Työtä kirjoitettaessa standardi on vielä keskeneräinen, mutta mesh-verkon toimintaan pääsee jo kuka tahansa tutustumaan avoimeen lähdekoodiin perustuvan open80211s:n avulla. Työssä esitelty mesh-verkkoa koskevat esimerkit perustuvat juuri open80211s toteutukseen. Avoin lähdekoodi luonnollisesti tarkoittaa, että kuka tahansa voi myös kehittää toteutusta - ja myös sitä, että laitetuki on olemassa vasta muutamille WLAN-sovittimille Linux-ympäristössä. IEEE 802.11s mesh-verkkoa käsiteltävissä kehyksissä ja tietoelementeissä lähteenä on käytetty IEEE 802.11s draftia (maaliskuu 2009), joten on mahdollista että lopullinen IEEE 802.11s standardi tulee osittain poikkeamaan tässä työssä esitetystä.

Mesh-verkkojen suurin ero perinteisiin langattomiin verkkoihin on siinä, ettei verkossa tarvita lainkaan reitittimiä, vaan jokainen mesh-verkon laite osaa myös reitittää sille tulleen paketin tarvittaessa eteenpäin. Radiolinkkien muodostus hoidetaan täysin automaattisesti, ja liikennöinti tapahtuu aina optimaalisinta reittiä. Tämä uniikki piirre tekee verkosta erityisen joustavan, mobiilin ja vikasietoisen.

Mesh-verkon toiminta perustuu ns. *beacon* signaaleihin (merkki- tai majakkasignaali). Mesh asema ilmoittaa signaalilla tasaisin väliajoin olemassaolostaan, sekä tarjoamistaan palveluista ja resursseista – samaan tapaan kuin tukiasema perinteisessä langattomassa verkossa. Verkon reititys on toteutettu Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) protokollalla, joka sisältää *on demand* ja *proactive tree* reititysmuodot, jotka mahdollistavat joustavan ja vikasietoisen verkon, ja samalla tarjoavat mahdollisuuden keskittää liikennettä ns. root aseman kautta.

Mesh-verkossa data voi kulkea suoraan lähettäjältä vastaanottajalle, mutta usein paketit reitittyvät monen aseman kautta (multihopping). Tällainen tilanne muodostuu, jos keskustelevat asemat ovat radiokantaman ulkopuolella, mutta yhteys on silti olemassa väliasemien avulla. Tästä aiheutuu suuria haasteita verkon tietoturvaan – paketit voivat kulkea asemien kautta joille niitä ei suoranaisesti ole tarkoitettu. Mesh asema joutuu myös käyttämään resurssejaan koko verkon hyväksi reitittämällä liikennettä eteenpäin - rajoittaen akkukäyttöisten laitteiden toiminta-aikaa. Mesh-verkkojen tietoturva ja virransäästö eivät kuulu tämän työn kohdealueisiin, niitä käsitellään enemmän IEEE 802.11s draftissa.

2 Langattomat lähiverkot

2.1 IEEE 802.11 standardit

Langattomien lähiverkkojen standardointia ja kehitystä ajaa IEEE 802.11 työryhmä, jonka aikaansaannoksia ovat mm. tällä hetkellä kuluttajamarkkinoillakin laajasti käytössä olevat 802.11b ja 802.11g verkot. Kehitys kuitenkin alkoi jo vuonna 1991 ja ensimmäinen versio 802.11 standardista julkaistiin vuonna 1997. Taulukossa 1 on esitetty tärkeimpien 802.11 standardien julkaisuvuosia ja ominaisuuksia. /2/

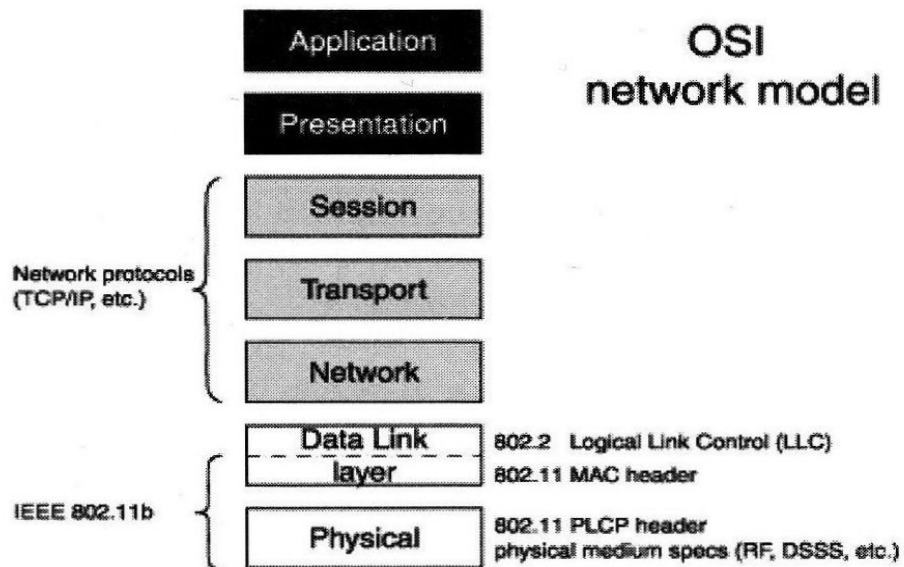
Taulukko 1. Tärkeimmät IEEE 802.11 standardit /2/

Standardi	Julkaisuvuosi	Toimintataajuus / Ghz	Nopeus / Mbit/s
802.11	1997	2.4	1 (tai 2)
802.11a	1999	5	54
802.11b	1999	2.4	11
802.11g	2003	2.4	54
802.11n	2010 (arvio)	5 ja/tai 2,4	600

Alkuperäistä 802.11 standardia ei ole enää nykyään käytössä, vaan se on korvattu 802.11a/b/g verkoilla. Yleisimmin käytetään 802.11g standardiin käytettäviä verkkoja, jotka ovat taaksepäin yhteensopivia myös vanhempia standardeja tukevien laitteiden kanssa. 802.11n verkko ei ole vielä virallisesti standardoitu, mutta laitevalmistajat ovat jo tuoneet standardiin perustuvia laitteita markkinoille – luottaen siihen että mahdolliset muutokset lopullisessa versiossa voidaan korjata firmware-päivityksillä.

Verkkojen kehitys on ollut nopeaa ja 802.11 verkkoja – tai tarkemmin niiden lisäominaisuuksia – on olemassa jo toistakymmentä. Mesh-verkkoa kuvaava standardi 802.11s voidaan mieltää lisäominaisuudeksi, sillä se ei tuo verkkoon suoranaisesti lisää nopeutta tai vaihda toimintataajuutta. /2/

IEEE 802.11 verkot toimivat OSI-mallin fyysisellä kerroksella sekä osittain siirtokerroksella – eli mallin kahdella alimmalla tasolla (kuva 1). Fyysisellä kerroksella määritetään käytettävien laitteiden *fyysiset*, sekä *sähköiset* ominaisuudet. 802.11 verkoissa käytettävät laitteet ja niiden yhteensopivuus on määritelty juuri fyysisellä kerroksella, ja MAC-tason yhteensopivuus siirtokerroksella. /1,3/



Kuva 1. 802.11 - standardit OSI-mallissa /1/

Siirtokerros jaetaan kahteen osaan: *Logical Link Controliin* (LLC) sekä *Media Access Controliin* (MAC). LLC-tasolla hoidetaan kanavointi sekä osoitteet. MAC-kerros mahdollistaa saman siirtotien – tässä tapauksessa radiotien – käytön useille eri laitteille samanaikaisesti. /3/

2.2 open80211s

Open80211s on monen eri yrityksen yhteenliittymä, jonka perustajajäseninä toimivat Nortel sekä Cozybit. Sen tarkoituksena on kehittää avoimeen lähdekoodiin perustuvaa versiota IEEE 802.11s standardista. Toteutus toimii Linux-ympäristössä ja on rakennettu mac80211 wireless stackin (langattomien verkkolaitteiden ohjelmointirajapinta) päälle, joka mahdollistaa toimivuuden käytännössä kaikilla tätä tukevilla korteilla. Open80211s hyväksyttiin osaksi Linuxin kerneliä alkaen versiosta 2.6.26. Mainline kernelin lisäksi on mahdollista käyttää *wireless-testing* kerneliä, joka on kustomoitu erityisesti langattomien lähiverkkojen kehitykseen ja testaukseen. Kolmas tapa on käyttää *compat-wireless*-pakettia, joka lisää wireless-testing kernelin ominaisuuksia - käytännössä uudempia laiteajureita - muihin kernel versioihin. /4/

Pelkkä mac80211 wireless stack tuki ei kuitenkaan vielä takaa open80211s:n toimivuutta, sillä lisäksi tarvitaan myös open80211s tuettu WLAN-sovittimen ajuri. Ajantasalla oleva lista toimivista laiteajureista löytyy open80211s:n sivuilta, työtä kirjoitettaessa tilanne oli taulukon 2 mukainen. /4/

Taulukko 2. Open80211s tuetut WLAN-ajurit (27.7.2009) /4/

Ajuri	Tuettu
ath5k	2.6.29
ath9k	wireless-testing
b43	2.6.27
libertas_tf	2.6.27
p54	2.6.29
rt2x00	2.6.2.30
zd1211rw	2.6.26

Ajurit on nimetty niiden käyttämien piirisarjojen mukaan, joten oman WLAN-sovittimen toiminnan varmistaminen on syytä aloittaa piirisarjan selvittämisestä. Mukana on suuriakin piirisarjojen valmistajia, mutta tuki ei ole vielä täysin kattava, ja on enemmän kuin todennäköistä että perus kotikäyttäjän tietokoneen sisäänrakennettu WLAN-piiri ei ole tuettujen laitteiden listalla.

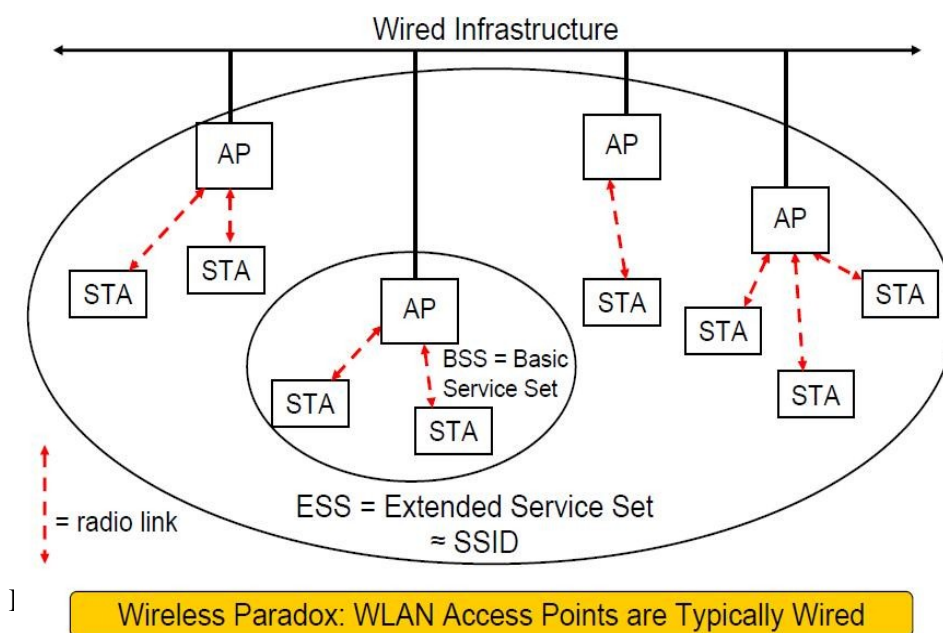
Open802.11s eroaa jonkin verran toiminnallisuudeltaan tulevasta virallisesta IEEE 802.11s standardista, mutta perustoimintaidea on implementoitu varsin kattavasti. Se tarjoaa hyvän lähtökohdan mesh-verkkojen luomiseen sekä testaamiseen. Se ei vielä tätä työtä kirjoitettaessa kata kaikkia lopullisen standardin ominaisuuksia – kuten käyttäjien autentikointia tai salausta – mutta lisäominaisuuksia voi periaatteessa kuka tahansa kehittää, sillä kyseessä on avoimeen lähdekoodiin perustuva toteutus.

3 Verkon topologia

Vaikka mesh-verkot ovatkin jatkumoa IEEE 802.11 standardien mukaisille verkoille, on niiden topologia erilainen verrattuna aikaisempiin verkkoihin.

3.1 IEEE 802.11 BSS

Basic Service Set (BSS, liityntäpiste) kuvaa tukiasemasidonnaisen verkon toimintaa. Verkon topologia on kuvan 2 kaltainen.



Kuva 2. Tukiasemasidonnaisen verkon topologia /5/

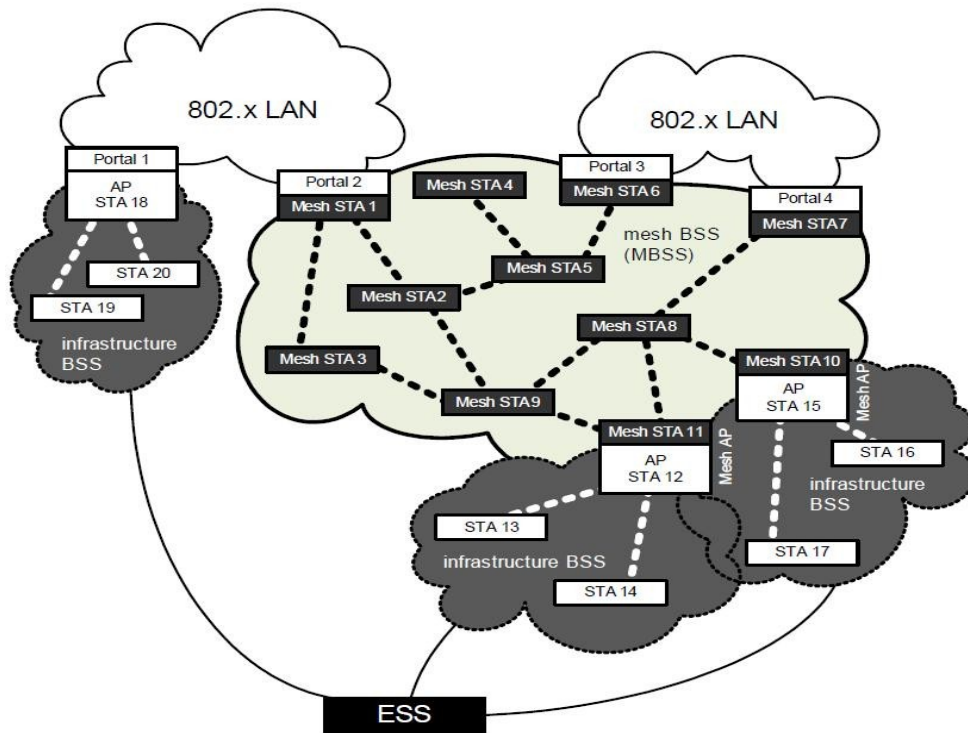
Access Point (AP, tukiasema) on linkki joka yhdistää *Stationit* (STA, asema) toisiinsa radioteitse. Yhden tukiaseman alla olevat laitteet mielletään BSS:ksi, ja useammat yhteenliitetyt tukiasemakokonaisuudet *Extended Service Setiksi* (ESS, jatkettu

liityntäpiste). Verkon palvelut muodostuvat tukiaseman kautta. Vaikka asemat keskustelevat keskenään langattomasti, ovat tukiasemat yleensä kiinteällä kaapeloinnilla kiinni toisissaan, sekä mahdollisesti reitittimiin ja muihin verkon elementteihin. Kiinteä kaapelointi tekee tukiasemoiden sijoittamisesta äärimmäisen tärkeää, kun tavoitteena on mahdollisimman kustannustehokas ja peittoalueeltaan kattava verkko. Lisäksi kaapelin asennus on suurissa tiloissa usein yllättävän työläs ja kallis urakka, ja sitä tarvitaan usein lisää kun verkkoa laajennetaan.

3.2 IEEE 802.11s verkko

Mesh Basic Service Set (MBSS, mesh liityntäpiste) kuvaa mesh-verkkoa ja sen toimintaa. Mesh-verkon topologiaa ja sen liityntää muihin verkkoihin on esitetty kuvassa 3. Mesh-verkko sisältää ainoastaan *Mesh Stationeja* (Mesh STA, mesh asema) joiden välille luodaan linkkejä. Liikenne reitittyy samanarvoisten asemien välillä – olettaen että käytössä ei ole root asemaa (root asemasta enemmän luvussa 5). Mesh-verkko voidaan yhdistää muihin IEEE 802.x verkkoihin *Mesh Access Pointin* kautta (Mesh AP, mesh tukiasema) sekä *Portalin* avulla (portaali). Molemmat toiminnot toteutetaan mesh asemilla joiden alkuperäinen toiminnallisuus säilyy – eli mesh asema toimii myös tavallisena mesh-verkon jäsenenä, vaikka se olisi samalla myös tukiasema tai portaali. /6/

Mesh tukiasema mahdollistaa kommunikoinnin mesh-verkkoon kuulumattoman laitteen kanssa (STA). Mesh tukiasema ei saa erityiskohtelua mesh-verkossa, sillä se ainoastaan tarjoaa liityntäpisteen mesh-verkon ulkopuolisille laitteille. Portaali taas mahdollistaa liikennöinnin toisiin IEEE 802.x verkkoihin. /6/



Kuva 3. Mesh-verkon topologia ja sen liittynät muihin verkkoihin /6/

Mesh-verkko muodostuu periaatteessa jo kahdesta mesh asemasta. Mesh tukiasemia ja portaaleja ei ole pakko käyttää, mutta joissain tilanteissa on tietysti hyödyllistä sallia mesh-verkon liikenne esim. internetiin portalin kautta, tai mahdollistaa kommunikointi muiden asemien kanssa mesh tukiaseman avulla.

4 Verkon muodostus ja palvelut

4.1 open80211s verkon muodostus

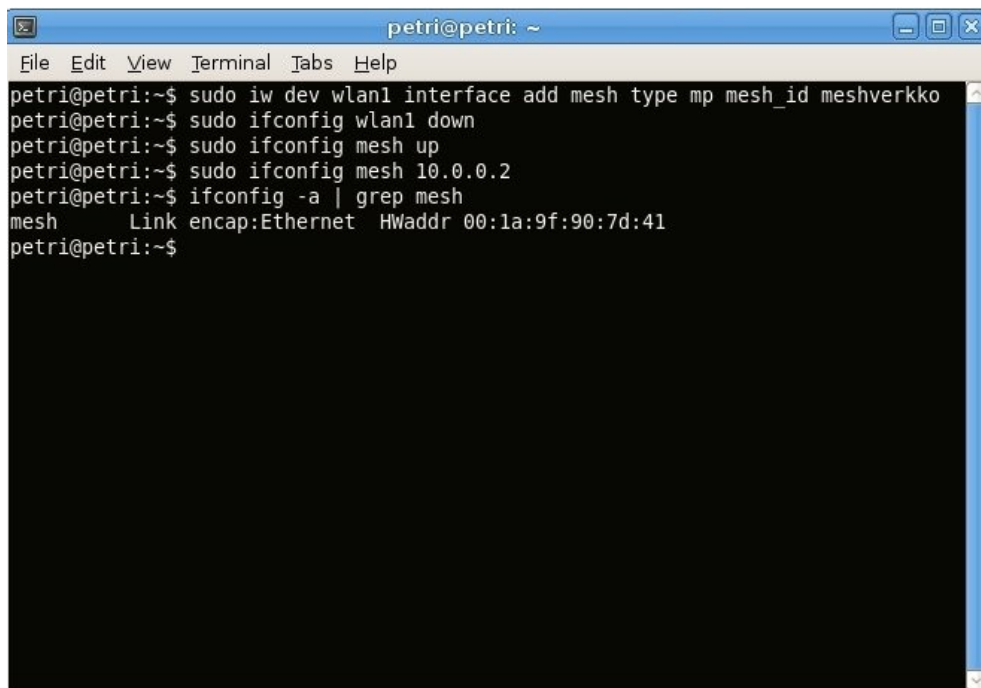
Open80211s mahdollistaa mesh-verkon rakentamisen vaikka virallista 802.11s standardia – tai sitä tukevia laitteita – ei vielä ole olemassa. Open80211s tuki on toistaiseksi olemassa ainoastaan Linux-käyttöjärjestelmille, jossa se on hyväksytty osaksi pääkerneliä.

Verkon muodostus on tehty käyttäjän kannalta mahdollisimman yksinkertaiseksi. Periaatteena on, että meshiä tukeva laite ilmoittaa itsestään lähettämällä tasaisin väliajoin beacon-signaalia, jolla se ilmoittaa olemassaolostaan verkon muille jäsenille. Samaa käytäntöä hyödynnetään perinteisissä tukiasemissa. /6/

Verkko yksilöidään sen käyttämän *mesh id*:n perusteella. Verkon muodostaminen open80211s ympäristössä voidaan tehdä yksinkertaisimmillaan luomalla meshiä tukevalle sovitinmelle *mesh interface* (mesh rajapinta) tietyllä mesh id:llä, ja määrittämällä IP-osoite. Kun tämä tehdään muutamalla asemalla, tapahtuu verkon muodostus automaattisesti. Ainoana vaatimuksena on, että saman verkon jäsenillä on oltava sama mesh id sekä niiden IP-osoite on oltava samassa aliverkossa. Lisäksi linkkien välisen etäisyyden on oltava tarpeeksi lyhyt. Pisin mahdollisin etäisyys on laitekohtainen, mutta välimatka on maksimissaan muutamia kymmeniä metrejä. Open80211s verkko ei tätä työtä kirjoitettaessa sisällä sinällään minkäänlaista käyttäjien autentikointia tai tiedon salausta. /4/

4.1.1 Verkon muodostus iw:llä

Verkon muodostukseen käytetään *iw* – nimistä sovellusta, jolla voidaan hallinnoida mac80211 tuettuja langattomia laitteita. Kuvassa 4 on esitetty mesh-verkon muodostus terminaalissa (käyttöjärjestelmänä Ubuntu 8.10). /4/



```
petri@petri: ~  
File Edit View Terminal Tabs Help  
petri@petri:~$ sudo iw dev wlan1 interface add mesh type mp mesh_id meshverkko  
petri@petri:~$ sudo ifconfig wlan1 down  
petri@petri:~$ sudo ifconfig mesh up  
petri@petri:~$ sudo ifconfig mesh 10.0.0.2  
petri@petri:~$ ifconfig -a | grep mesh  
mesh      Link encap:Ethernet HWaddr 00:1a:9f:90:7d:41  
petri@petri:~$
```

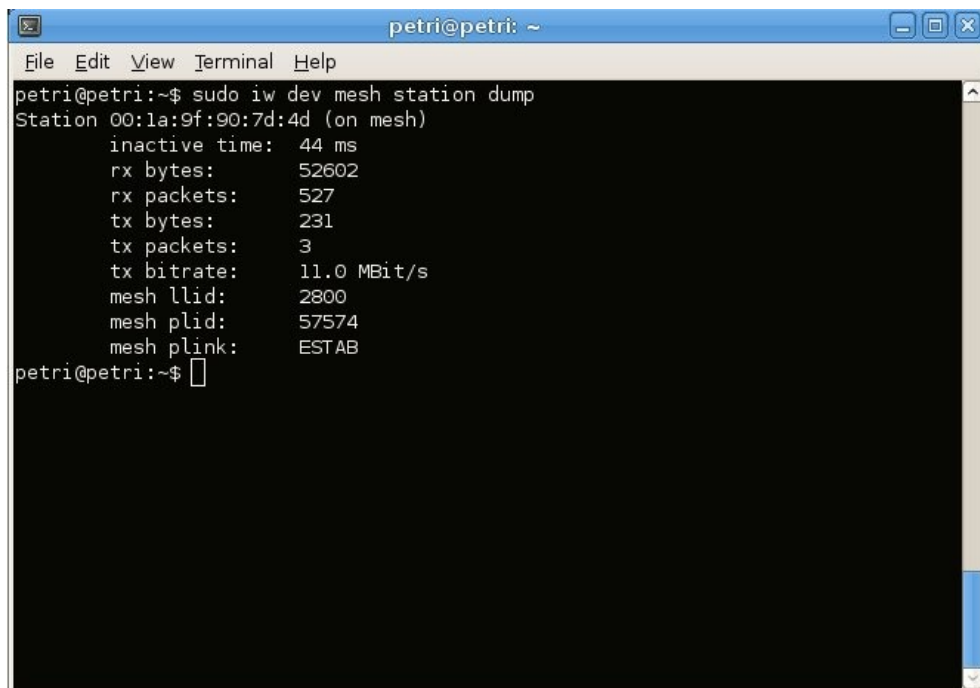
Kuva 4. Mesh-verkon luominen iw:llä.

Verkko luodaan seuraavasti:

- Ensimmäisellä rivillä luodaan mesh interface laitteelle wlan1, kiinnitetään se mesh asemaksi ja määritetään verkon mesh id:ksi *meshverkko*.
- Toisella rivillä ajetaan laite wlan1 alas, koska se todennäköisesti on jo sidottu johonkin toiseen interfaceen, esim. 802.11g verkkoon. Laite voi olla vain yhdessä interfacessa kerrallaan. Tässä koneessa wlan1 on laite, joka tulee toimimaan mesh-verkon sovittimena.

- Seuraavaksi aktivoidaan mesh interface.
- Neljännellä rivillä määritellään mesh interfacessä olevalle laitteelle IP-osoite 10.0.0.2
- Lopussa komennolla *ifconfig -a | grep mesh* voidaan varmistaa että mesh-verkon luonti onnistui. /4/

Iw:llä voidaan myös tarkistaa muodostuneiden linkkien tila komennolla *sudo iw dev mesh station dump* (kuva 5). Nämä linkit muodostuvat automaattisesti muutaman sekunnin viiveellä asemien konfiguroinnin jälkeen. /4/



```
petri@petri: ~  
File Edit View Terminal Help  
petri@petri:~$ sudo iw dev mesh station dump  
Station 00:1a:9f:90:7d:4d (on mesh)  
    inactive time: 44 ms  
    rx bytes:      52602  
    rx packets:    527  
    tx bytes:      231  
    tx packets:    3  
    tx bitrate:    11.0 MBit/s  
    mesh llid:     2800  
    mesh plid:     57574  
    mesh plink:    ESTAB  
petri@petri:~$
```

Kuva 5. Linkkien listaus iw:llä.

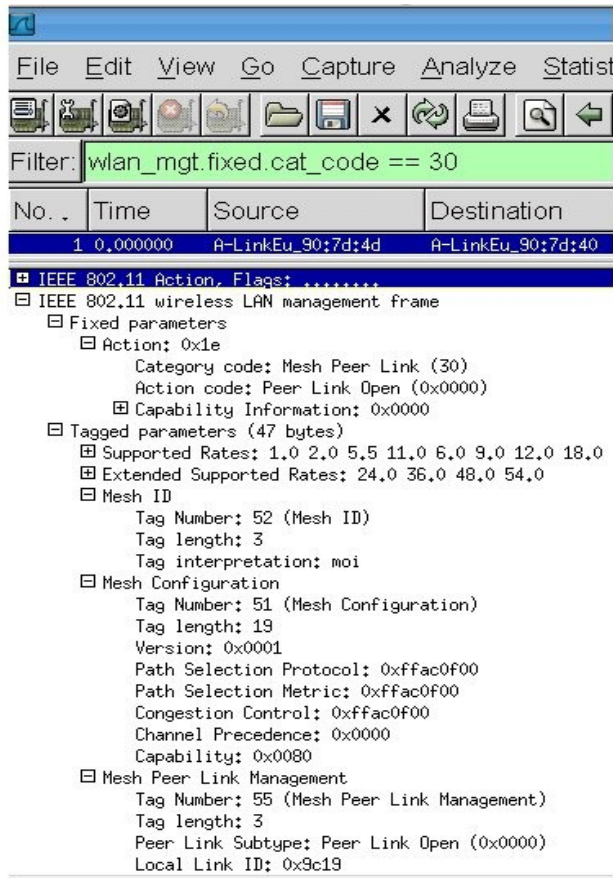
Station dump listaa muodostuneet linkit ja antaa niistä tietoja. Tässä tilanteessa on muodostunut yksi linkki laitteeseen, jonka MAC-osoite on 00:1a:9f:90:7d:4d. Komento ei siis näytä oman aseman tietoja – ainoastaan muodostuneet linkit. Komennolla

nähdään mm. tälle asemalle lähetettyn ja siltä vastaanotetun tiedon määrä tavuina ja paketteina, linkin nopeus sekä linkin tila. Verkkoa voidaan tarkastella kätevämminkin sen tarjoamien palveluiden avulla käyttämällä *Avahi*. Tästä enemmän luvussa 4.2, verkon palvelut. /4/

Kun laitteita on lisätty verkkoon, toimii verkko täysin kuten tavallinen WLAN-verkko sillä kaikki palvelut toimivat samalla tapaa (esim. FTP, SSH, verkkopelit). Vaikka verkon tekeminen vaatii vielä tässä vaiheessa terminaalikomentoja, voidaan verkon muodostus tehdä käyttäjälle kuitenkin varsin helpoksi yksinkertaisella käyttöliittymällä. IP-osoitteetkin voidaan jakaa automaattisesti DNS palvelun avulla. Demola projektissa suunniteltiin sovellus juuri tähän tarkoitukseen - sitä on esitelty enemmän liitteessä 1.

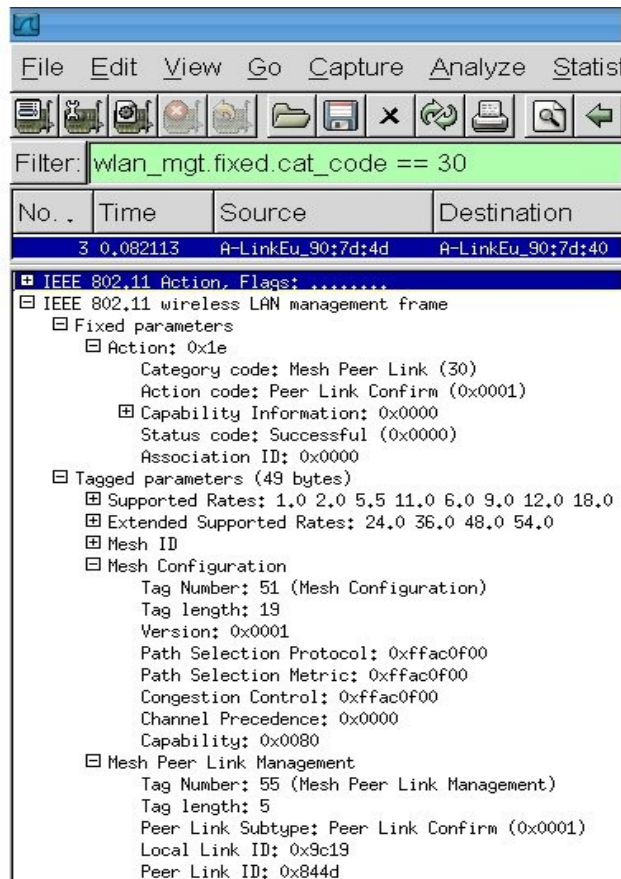
4.1.2 Verkon muodostus protokollatasolla

Verkon muodostusta voidaan tarkastella hieman tarkemmin esimerkiksi *Wireshark*-protokollanalysointiohjelmalla. Wireshark antaa varsin tarkasti tietoa siitä, mitä verkossa tapahtuu. Tarkastellaan linkin luomista *peer link open* ja *peer link confirm* elementtien kautta (näistä lisää luvussa 5.2 Elementit). Kuvassa 6 nähdään mesh linkin avaus Wiresharkissa.



Kuva 6. Linkin avaus

Kuvassa 6 tarkastellaan pakettia, joka liittyy linkin luomiseen. Paketista nähdään että kyseessä on linkin avaukseen liittyvää tietoa, jossa lähettäjä ilmoittaa vastaanottajalle tukemistaan nopeuksista, mesh id:stä, käytettävästä protokollasta sekä linkin laadusta. Linkin avaus tehdään molempiin suuntiin. Avaukseen lähetetään aina vahvistus (Kuva 7) jossa linkin luonti vahvistetaan.



Kuva 7. Linkin vahvistus

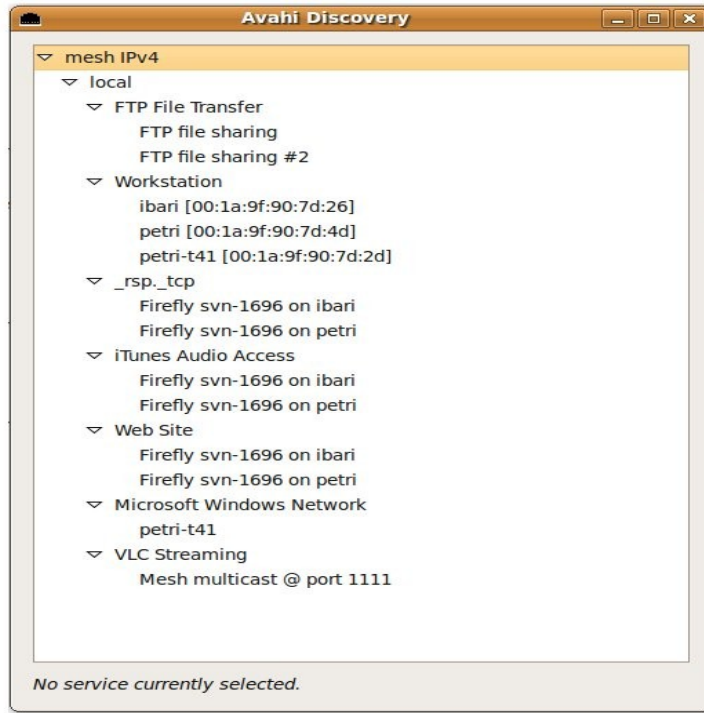
Linkin vahvistus paketti pitää sisällään lähes samat tiedot kuin avauskin, ja sekin lähetetään molempiin suuntiin. Se on kuitenkin osa linkin muodostusta ja jos vahvistuksia ei saada, ei linkkiä muodostu asemien välille.

4.2 Verkon palvelut

Verkossa on aina olemassa palveluita ja sitä käyttävillä laitteilla erilaisia resursseja. Resursseilla tarkoitetaan laitteen ominaisuuksia ja mahdollisia rajoituksia toimia verkon jäsenenä. Palveluita ovat esimerkiksi host name (nimipalvelu), FTP, mediaserveri tai tulostuspalvelu. Verkon palveluiden automaattista ilmoittamistapaa ja etsimistä kutsutaan *service discovery*ksi. Service discovery on osa *Zeroconf* tekniikkaa, joka mahdollistaa myös automaattiset nimipalvelut ja IP-osoitteiden jaot.

Zeroconfin tarjoama automaattinen palveluiden ilmoittaminen voi osoittautua mesh-verkoissa hyödylliseksi tavaksi löytää ja julkaista palveluita käyttäjälle entuudestaan tuntemattomassa verkossa. Lisäksi automaattinen DNS ja DHCP palvelu on erityisen hyödyllistä verkossa, jossa käyttäjän ei tarvitse huolehtia oman aseman konfiguroinnista.

Open80211s toteutus on Linux-pohjainen joten Zeroconf voidaan toteuttaa *Avahi*:lla, joka hyödyntää Ipv4LL, mDNS ja DNS-SD – protokollia. Avahi on sisällytetty useisiin Linux distroihin, mm. Ubuntuun, SUSEen, Debianiin sekä Fedoraan. Kuvassa 8 näkyy Ubuntussa käytettävän Avahi Discoveryn ikkuna.



Kuva 8. Avahin näyttämä service discovery ikkuna (käyttöjärjestelmänä Ubuntu 8.10)

Ikkunasta nähdään, että verkossa on kolme laitetta: *ibari*, *petri* ja *petri-t41*. Verkossa on myös useita palveluita, kuten FTP, mediaserveri sekä videostreamaus.

5 Reititys

5.1 HWMP

Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) on mesh-verkoissa käytettävä reitinvalintaprotokolla. HWMP käyttää yleisiä protokolla primitiivejä sekä sääntöjä *Ad Hoc On Demand Distance Vector* (AODV) protokollasta (IETF RFC dokumentti 3561). AODV:stä poiketen HWMP protokolla määrittää reitityksen MAC-osoitteiden perusteella - AODV:ssä reititys määritetään IP-osoitteilla. Pyrkimyksenä on myös mitata ja valita aina mahdollisimman nopea reitti asemien välille *link metric* arvon perusteella (linkin laadukkuus). HWMP protokolla käyttää reitinvalintaan erilaisia elementtejä, jotka sisältävät mm. juuri link metric arvoja. /6/

Mesh-verkoissa tapahtuu usein monihyppyjä, jossa data reitittyy yhden tai useamman väliaseaman kautta. Tämä asettaa suuria haasteita tietoturvaan ja virrankulutukseen: väliasemat joutuvat käsittelemään paketteja, jotka eivät niille suoranaisesti kuulu sekä joutuvat käyttämään resurssejaan koko verkon hyväksi – näitä ongelmia ei ole tukiasemasidonnaisessa verkossa. Sekuriteetti ja virrankulutus on huomioitu IEEE 802.11s draftissä, mutta ne eivät kuulu tämän työn kohdealueisiin.

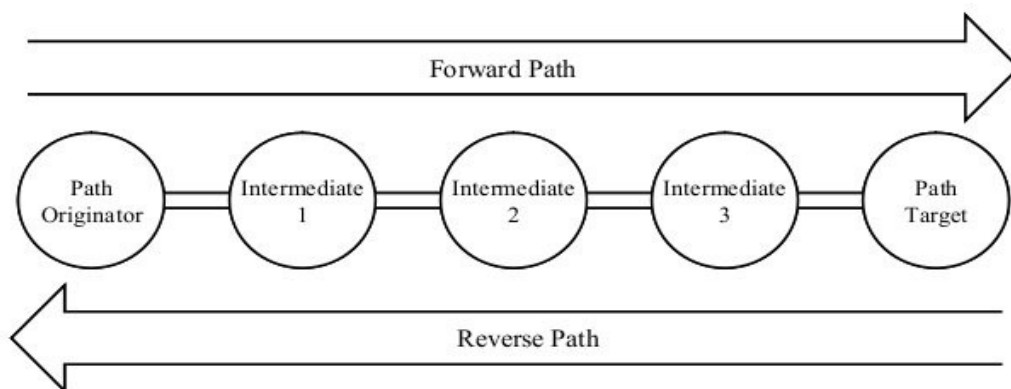
HWMP tarjoaa kaksi eri reititystapaa: *on demand mode* (reaaliaikainen, tarvittaessa reititettävä) sekä *proactive tree building mode* (ennakoiva, puurakenne). Nämä yhdessä mahdollistavat varsin kattavan tavan reitittää tietoa verkossa, sillä siinä yhdistyy on demand reitityksen tarjoama joustavuus, sekä mahdollisuus keskittää liikennettä proactive reitityksellä jos mesh-verkko on osana muuta verkkoinfrastruktuuria. /6/

Reititystavat eivät sulje pois toisiaan – proactive on aina on demand reitityksen tukena

ja usein molempia reititystapoja tapahtuu samaanaikaan verkossa. On demand reititystä tapahtuu aina mesh-verkoissa ja juuri se mahdollistaa mesh asemien välisen liikennöinnin. On demand reititystä käytetään aina jos root asemaa ei ole määritelty – mutta myös silloin kun verkossa on root asema mutta on demand reititys tarjoaa nopeamman reitin. Proactive reititystä käytetään siis ainoastaan on demandin ohella, jos verkkoon on määritelty root asema ja sen kautta saadaan nopeampi reitti. /6/

HWMP reitinvalinnassa on käytössä *sekvenssinumerot*, joilla reitit voidaan yksilöidä eikä silmukoita pääse syntymään. Jokaisella mesh asemalla on oma sekvenssinumeronsa joka sisältyy HWMP elementteihin – elementeistä lisää luvussa 5.2. /6/

Kuvassa 9 on esitelty reitinvalinnan termejä. Reitti muodostetaan molempiin suuntiin *reitin perustajan* (path originator) ja *reitin kohteen* (path target) välille ja väliasemia kutsutaan *välittäjiksi* (intermediate). /6/



Kuva 9. HWMP reitityksen terminologiaa /6/

5.1.1 On demand reitinvalinta

On demand reitityksessä tapahtuva reitinvalinta tapahtuu seuraavasti:

- Jos reititystietoa ei löydy aseman reititystaulusta reitin perustaja lähettää *Path Request* (PREQ, reittipyyntö) elementin verkkoon ja asettaa reitin kohteeksi kohdeaseman MAC-osoitteen.
- Kun asema vastaanottaa PREQ:in se tarkistaa reitin kohteen ja jos se ei ole oma MAC-osoite, lähettää se PREQ:in eteenpäin naapuriasemilleen.
- Kun PREQ lopulta saapuu kohteeseen, lähettää kohdeasema *Path Reply* (PREP, reittivastaus) primitiivin reitinperustajalle.
- Näin muodostuu monta reittiä molempiin suuntiin.
- Reitit erotellaan toisistaan HWMP sekvenssinumerolla ja valitaan nopein link metric tiedon perusteella. /6/

5.1.2 Proactive tree reitinvalinta

Proactive tree reititystä voidaan käyttää kahdella tavalla: *proactive PREQ* elementillä tai *RANN* elementillä (Root Announcement, root ilmoitus). /6/

Proactive PREQ elementti

Root asema lähettää proaktiivisen PREQ elementin *jokaiselle* mesh asemalle erikseen. PREQ:n saavat asemat vastaavat root asemalle PREP elementillä muodostaen linkit root aseman välille. PREQ voi saapua moneen kertaan kohdeasemalle eri reittejä pitkin. PREQ:t erotetaan toisistaan sekvenssinumerolla. Kohdeasema valitsee link metric tiedon perusteella parhaimman PREQ:n ja luo paluureitin PREP elementillä. Näin root asemalla on linkkitiedot jokaisesta mesh asemasta ja vastaavasti jokaisella

mesh asemalla on linkkitieto root asemasta. Root asema lähettää proaktiivista PREQ elementtiä säännöllisesti verkkoon, jotta reititystiedot pysyvät ajantasalla. /6/

RANN elementti

Root asema voi myös lähettää säännöllisesti RANN elementtiä verkkoon. RANN elementti eroaa proaktiivisesta PREQ elementistä siinä, että RANN elementti ainoastaan ilmoittaa mesh asemille root aseman olemassaolosta. Varsinainen reitinmuodostus mesh ja root aseman välillä tehdään on demand reitinvalinnalla. /6/

5.2 Tietoelementit

Mesh asemat keskustelevat keskenään protokollan mukaisesti erilaisilla elementeillä. Työtä kirjoittaessa erilaisia elementtejä on 23 kappaletta – tässä tarkastellaan muutamia HWMP reititykseen liittyviä elementtejä (jo aikaisemmin mainitut PREQ, PREP, RANN sekä PERR) ja verkon toimintaan oleellisesti vaikuttavia elementtejä (PANN sekä Mesh Configuration elementit).

5.2.1 PREQ elementti

Path Request (PREQ, reitin pyyntö) elementtiä (kuva 10) käytetään yhden tai useamman mesh aseman reitin löytämiseen, root aseman reitinvalintapuun tekemiseen sekä reitin varmistukseen. Kun mesh asema haluaa keskustella sille tuntemattoman laitteen kanssa – eli laitteen jolle ei ole reititystietoa – lähettää se verkkoon PREQ elementin. /6/

Element ID	Length	Flags	Hop-count	Time to Live	PREQ ID	Originator mesh STA Address	Originator HWMP Sequence Number	Originator Proxied Address	Lifetime
Octets:1	1	1	1	1	4	6	4	0 or 6	4

Metric	Target Count	Per Target Flags #1	Target Address #1	Target HWMP Sequence Number #1	...	Per Target Flags #N	Target Address #N	Target Sequence Number #N
4	1	1	6	4	...	1	6	4

Kuvia 10. PREQ elementti /6/

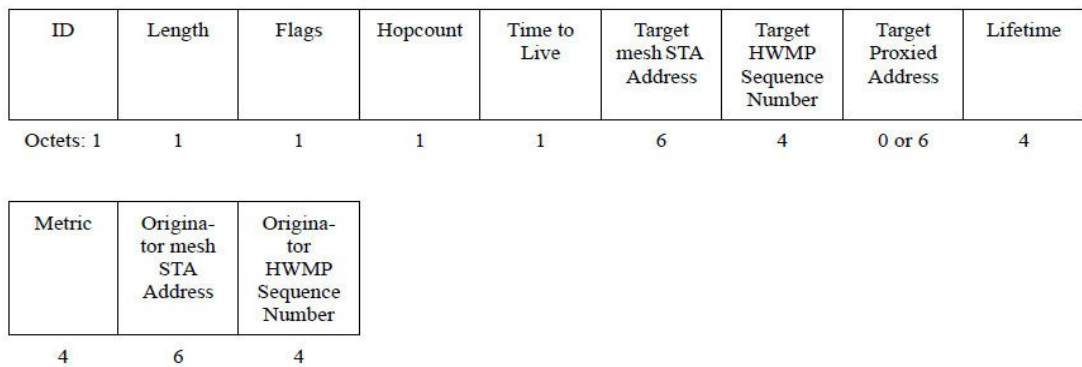
- *Element ID*:lle annetaan tunnettu arvo, jolla se erotetaan muista elementeistä.
- *Length* kenttä saa arvon välillä 37-255.
- *Flag* kentässä on käytössä bitit 0-7, joista 3-5 sekä 7 on varattu myöhempää käyttöä varten.
 - Bitti 0 määrää portaali moodin käytön.
 - Bitti 1 määrää osoitemuodon ryhmäosoitteiden ja yksittäisten osoitteiden välillä.
 - Bitti 2 määrää proaktiivisen PREP käytön (reitinvalintapuun teko).
 - Bitti 6 määrää *Adress Extension* (AE) bitin käytön. Jos arvo on 1 käytetään väliasemana olevaa laiteosoitetta.
- *Hopcount* kenttä ilmoittaa hyppyjen määrän .
- *Time To Live* (TTL) kenttä ilmoittaa maksimihyppyjen määrän.
- *PREQ ID* määrittää PREQ elementille oman ID arvon.
- *Originator mesh STA Address* kenttä kertoo PREQ kyselyn tehneen mesh aseman MAC-osoitteen 48-bittisenä.
- *Originator HWMP Sequence Number* kenttä kertoo lähettäjän HWMP

sekvenssinumeron.

- *Originator Proxied Address* kenttä kertoo väliasemana olleen aseman osoitteen.
- *Lifetime* kenttä ilmoittaa PREQ elementin voimassaoloajan.
- *Metric* kenttä ilmoittaa linkin laadukkuuden lähettävän ja vastaanottavan aseman välillä.
- *Target Count* kenttä ilmoittaa kohteiden määrän (kuinka monelle laitteelle PREQ on kohdistettu).
- *Per Target Flags* kenttä sisältää bitit 0-7 joista käytössä on 3 ensimmäistä:
 - Bitti 0 ilmoittaa *Target Only* (TO, vain kohde) bitin käytöstä. Jos TO bitti saa arvon 1, vain kohde asema voi vastata PREQ elementtiin. Jos TO bitti on 0, saavat myös muut PREQ:n vastaanottavat laitteet vastata. Tällöin saadaan kerralla enemmän reittejä, mutta aikaa kuluu enemmän.
 - Bitti 1 ilmoittaa *Reply and Forward* (RF) bitin käytöstä. Kun TO bitti saa arvon 0, RF bitillä voidaan estää (RF bitti 0) tai sallia RREQ kyselyn eteneminen (RF bitti 1). Jos TO bitti on arvossa 1, ei RF bitillä ole merkitystä.
 - Bitti 2 ilmoittaa *Unknown Target HWMP Sequence Number* (USN) bitin käytöstä. Jos USN bitti saa arvon 1, on HWMP sekvenssinumero tuntematon lähettäjälle.
- *Target Address* kenttä kertoo kohde aseman MAC-osoitteen 48-bittisenä.
- *Target HWMP Sequence Number* kenttä kertoo viimeisimmän lähettäjälle tunnetun HWMP sekvenssinumeron. /6/

5.2.2 PREP elementti

Path Reply (PREP, reitin vastaus) elementtiä (kuva 11) käytetään reitin luonnissa kohde asemalle. Sillä voidaan myös varmistaa, että kohde on tavoitettavissa. PREP lähetetään vastauksena RREQ kyselyyn. /6/



Kuva 11. PREP elementti /6/

- *Element ID*:lle annetaan jälleen tunnettu arvo, jolla se erotetaan muista elementeistä.
- *Length* kenttä saa arvot 31-37.
- *Flag* kentälle on varattu bitit 0-7, joista bitti 6 on AE bitti. Muut bitit on varattu myöhempää käyttöä varten.
- *Hopcount* kenttä kertoo hyppyjen määrän kohteesta kyseiselle mesh asemalle.
- *TTL* kenttä kertoo maksimihyppyjen määrän.
- *Target Mesh STA address* kentässä ilmoitetaan kohteen MAC-osoite 48-bittisenä.
- *Target HWMP Sequence Number* kenttä kertoo viimeisimmän lähettäjälle

tunnetun HWMP sekvenssinumeron.

- *Target Proxied Address* kenttää käytetään väliaseman kanssa ilmoittamaan PREP:n käytöstä.
- *Lifetime* kenttä ilmoittaa Path Request elementin voimassaolon TU:na
- *Metric* kenttä ilmoittaa linkin laadukkuuden lähettävän ja vastaanottavan aseman välillä.
- *Originator mesh STA Address* kenttä kertoo PREQ kyselyn tehneen mesh aseman MAC-osoitteen 48-bittisenä (löytyy PREQ:sta).
- *HWMP Sequence Number* kenttä ilmoittaa kyselyn tehneen aseman HWMP sekvenssinumeron (löytyy PREQ:sta). /6/

5.2.3 PERR elementti

Path Error (PERR, reittivirhe) elementtiä käytetään rikkoutuneen linkin ilmoittamiseen kaikille asemille, jotka ovat olleet reitittämässä kyseisellä reitillä (kuva 12). /6/

ID	Length	Mode Flags	Number of Destinations N	Destination Address #1	HWMP Sequence Number #1
Octets: 1	1	1	1	6	4

Kuva 12. PERR elementti /6/

- *ID*:lle annetaan jälleen tunnettu arvo, jolla se erotetaan muista elementeistä.
- *Length* arvo lasketaan $2 + 10 * \text{ilmoitettavien kohteiden määrä}$.

- *Mode Flags* kenttä on varattu myöhempää käyttöä varten.
- *Number of Destinations N* kentässä ilmoitetaan ilmoitettavien kohteiden lukumäärä.
- *Destination Address* kenttä sisältää tavoittamattoman aseman 48-bittisen MAC-osoitteen.
- *HWMP Sequence Number* kenttä sisältää tavoittamattoman aseman HWMP sekvenssinumeron. /6/

5.2.4 RANN elementti

Root Announcement (RANN, root ilmoitus) elementtiä (kuva 13) käytetään ilmoittamaan mesh asemasta, joka on konfiguroitu toimimaan root asemana. Root asema lähettää joko RANN elementtejä, tai proaktiivista PREQ elementtiä säännöllisesti verkkoon. RANN voidaan lähettää joko beacon-signaalissa tai *Mesh Path Selection Action* kehyksessä. /6/

Element ID	Length	Flags	Hopcount	Time to Live	Root mesh STA Address	HWMP Sequence Number	Metric
Octets: 1	1	1	1	1	6	4	4

Kuva 13. RANN elementti /6/

- *Element ID* kenttään tulee RANN elementin tunnistamiseksi tietty arvo.
- *Length* kenttä saa arvon 17.
- *Flag* kenttään bitillä 0 määrätään portaali rooli päälle/pois, bitit 1-7 ovat varattu

myöhempää käyttöä varten.

- *TTL* arvo ilmoittaa maksimihyppyjen määrän.
- *Root mesh STA Address* kentässä ilmoitetaan root asemana toimivan mesh aseman osoite 48-bittisenä MAC-osoitteena.
- *HWMP Sequence Number* kenttä ilmoittaa root aseman HWMP sekvenssinumeron.
- *Metric* kenttä ilmoittaa linkin laadukkuuden root aseman ja vastaanottavan aseman välillä. /6/

5.2.5 PANN elementti

Portal Announcement (PANN, portaalin ilmoitus) elementtiä (kuva 14) käytetään mesh-verkossa ilmoittamaan verkon jäsenille mesh asemasta joka toimii myös portaalina. Tätä tietoa voidaan tarvita tehokkaampaan liikennöintiin MBSS:n ulkopuolella proaktiivista reititistapaa käytettäessä. /6/

Element ID	Length	Flags	Hopcount	Time to Live	Mesh Portal Address	PANN Sequence Number
Octets: 1	1	1	1	1	6	4

Kuva 14. PANN elementti

- *Element ID*:lle annetaan jälleen tunnettu arvo, jolla se erotetaan muista elementeistä.
- *Length* kenttä saa arvon 13.

- *Flag* kenttä on varattu myöhempään käyttöön.
- *Hopcount* kenttä ilmoittaa montako hyppyä PANN kutsu on tehnyt saapuessaan vastaanottajalle. PANN:tia lähetettäessä mesh portaali antaa sille arvon 0.
- *TTL* arvo ilmoittaa maksimihyppyjen määrän.
- *Mesh Portal Address* kentässä ilmoitetaan mesh portaalina toimivan mesh aseman osoite 48-bittisenä MAC-osoitteena.
- *PANN Sequence Number* kenttä ilmoittaa mesh portaalin PANN sekvenssinumeron. /6/

5.2.6 Mesh konfiguraatio elementti

Mesh Configuration Element (kuva 15) pitää sisällään mesh aseman palveluilmoitukset. Se sisältyy beacon-signaaliin ja sitä käytetään myös linkin luonnissa. /6/

ID	Length	Version	Active Path Selection Protocol Identifier	Active Path Selection Metric Identifier	Congestion Control Mode Identifier	Synchronization Protocol Identifier	Authentication Protocol Identifier	Mesh Formation Info	Mesh Capability
Octets :1	1	1	4	4	4	4	4	1	2

Kuva 15. Mesh konfiguraatio elementti /6/

- *ID* kenttään tulee ennalta annettu arvo jolla konfiguraatio elementti tunnistetaan muista elementeistä.
- *Length* kenttä saa arvon 24 ja *Version* kenttä arvon 1.
- *Active Path Selection Protocol Identifier* kenttä sisältää tiedon käytettävästä

reitINVALINTAPROKOLLASTA. Vaikka mesh-verkko tukee useampaa eri protokollaa, ei samassa mesh-verkossa voi olla käytössä kuin yksi reitINVALINTAPROKOLLA. Oletuksena käytössä on HWMP.

- *Active Path Selection Metric Identifier* kentässä ilmoitetaan linkin laadusta vastaavan protokollan käytöstä.
- *Congestion Control Mode Identifier* kenttä ilmoittaa käytössä olevan ruuhkanhallintaprotokollaa. Oletusarvona käytetään mesh-verkkojen omaa protokollaa, mutta laitevalmistaja voi käyttää omaa tapaansa tai ruuhkanhallintaa ei ole pakko käyttää ollenkaan.
- *Synchronization Protocol Identifier* kentässä ilmoitetaan käytettävä synkronisaatioprotokolla ja *Authentication Protocol Identifier* kentässä käytettävä autentikaatioprotokolla. Mesh-verkko tarjoaa myös näihin omat protokollat, mutta myös valmistajakohtaisia protokollia voidaan käyttää tai ne voidaan jättää kokonaan pois.
- *Mesh Formation Info* kentässä ilmoitetaan mahdollisesta portaalin käytöstä sekä naapuri mesh asemien määrästä.
- *Mesh Capability* kenttään voidaan asettaa useita aseman ominaisuuksia, kuten linkkien salliminen, eteenpäin reititys, virransäästön käyttö jne. /6/

6 Yhteenveto ja tulevaisuuden pohdinta

Tämä opinnäytetyö esitteli mesh-verkkojen toimintaa, sen reititystä ja vertasi sitä tukiasemasidonnaisiin langattomiin verkkoihin. Vaikka mesh-verkon toteutus perustuu aikaisempiin IEEE 802.11 verkkoihin, sen toimintatapa ja topologia eroaa huomattavasti aikaisemmista langattomista verkoista. HWMP reitinvalintaprotokolla mahdollistaa mobiiliin, vikasietoisen ja joustavan verkon moneen eri tilanteeseen ja olosuhteeseen. Mesh-verkossa linkit muodostuvat automaattisesti, ja data voi reitittyä monen eri aseman kautta. Mesh-verkko ei tarvitse kaapelointia, joten sen käyttöönotto on yhtä helppoa niin maantieteellisesti haastavilla alueilla kuin kaupunkiympäristössäkin.

Tulevaisuuden mesh-verkko mahdollistaa monia eri käyttämahdollisuuksia. Päätelaitteina voidaan käyttää tietokoneiden lisäksi kännyköitä, tai mitä tahansa kodin viihde-elektroniikkaa. Käytön helppous, verkon automaattinen muodostus ja vikasietoisuus tekee mesh-verkosta vartenotettavan vaihtoehdon joka kodin tai toimiston sisäiseksi langattomaksi verkoksi, jossa laitteita ei enää tarvitse yhdistää toisiinsa johdoilla tai konfiguroida tukiasemia. Mesh-verkkojen yleistyminen vaatii kuitenkin virallisen standardin valmistumisen, sillä laitetuen on oltava erityisen kattava jotta verkkoa voidaan tehokkaasti hyödyntää.

Demola projektissa tilaajan toiveena oli toimivan ohjelmistopakettien lisäksi myös selvittää open80211s mesh toteutuksen taso. Vaikka projektin tuloksiin oltiin tyytyväisiä, ei open80211s sinänsä lunastanut täysin lupauksiaan. Open80211s ei sisällä kaikkia meshin kannalta varsin oleellisia ominaisuuksia, kuten salausta, käyttäjien autentikointia tai edes olemassaolevien verkkojen selailua. Tämä hankaloitti projektin läpivientä – varsinkin kun tavoitteena oli tehdä kuluttajamarkkinoille soveltuva mesh-verkon hallinnointityökalu. Projektin tuloksia on esitelty liitteessä 1.

LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Benny Bing, Wireless Local Area Networks [kirja]

Sähköiset lähteet

- 2 Wikipedia [www-sivu] IEEE 802.11 [viitattu 7.7.2009] Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- 3 Wikipedia [www-sivu] OSI model [viitattu 7.7.2009] Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model
- 4 open80211s [www-sivu] open80211s Trac [viitattu 16.6.2009] Saatavissa:
<http://o11s.org/trac>
- 5 IEEE 802 [www-sivu] 802.11s Tutorial [viitattu 4.3.2009] Saatavissa:
http://www.ieee802.org/802_tutorials/nov06/802.11s_Tutorial_r5.pdf
- 6 IEEE 802.11s Draft [PDF dokumentti] IEEE P802.11s/D3.0 March 2009 [viitattu 25.7.2009]

LIITTEET

Liite 1: Power of Mesh demosovelluksen esittely

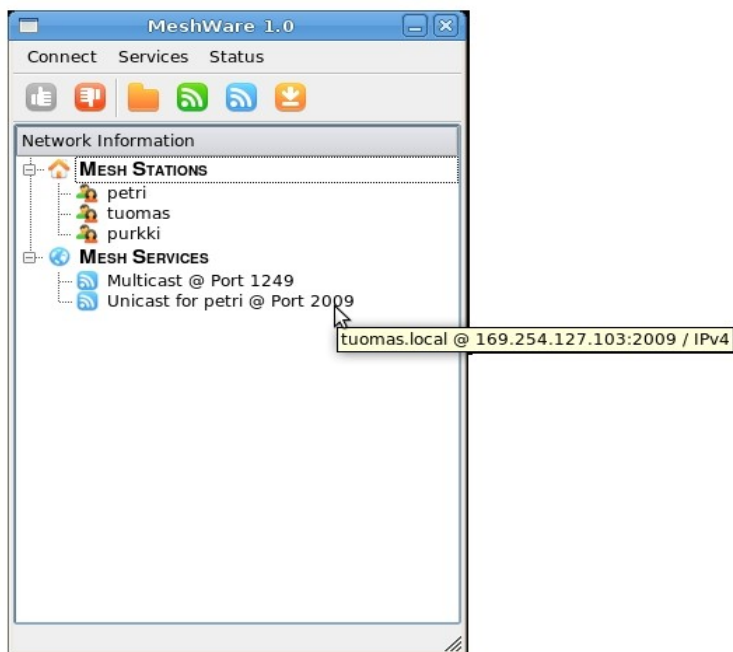
Demola projekti 37: Power of Meshin tavoitteena oli rakentaa toimiva mesh-verkko, joka perustuu open80211s avoimeen lähdekoodiin, sekä suunnitella ja toteuttaa sovellus joka hyödyntää mesh-verkon ominaisuuksia.

Työ aloitettiin tutkimalla open80211s:n asettamia vaatimuksia. Käyttöjärjestelmäksi valittiin Ubuntu Linux ja testialustana toimivat IBM Thinkpad T40, T41 sekä T42 kannettavat tietokoneet. Thinkpadien käyttämä WLAN-piirisarja ei kuitenkaan ollut open80211s:n tuettujen ajurien listalla, joten WLAN-sovittimiksi valittiin A-linkin WL54USB, joka käyttää tuettua *zd1211rw*-ajuria. Ubuntusta käytettiin alunperin versiota 8.10, jonka päälle konfiguroitiin wireless-testing kerneli. Projektin edetessä käyttöjärjestelmä päivitettiin versioon 9.04 ja ajurien epävakauden vuoksi siirryttiin wireless-testing kernelistä compat-wireless paketin käyttöön mainline kernelissä, joka takaa uusimmat ajuriversiot.

Projekti aloitettiin mesh-verkon rakentamisella ja testauksella. Testejä tehtiin niin ulkoilmassa kuin sisätiloissa. Testeillä voitiin todeta monihypyn ja linkkien automaattisen muodostuksen toimivuus. Tiedonsiirtonopeus oli myös hyvällä tasolla – eniten nopeutta rajoittivat puutteellisesta Linux-tuesta johtuvat testikoneiden hitaat USB 1.0 portit. WLAN-sovittimien ajurituen kanssa oli myös ajoittain ongelmia, mutta *zd1211rw* oli käytännössä ainoa ajuri joka mahdollisti USB-väylää käyttävät WLAN-sovittimet jotka olivat helposti saatavilla.

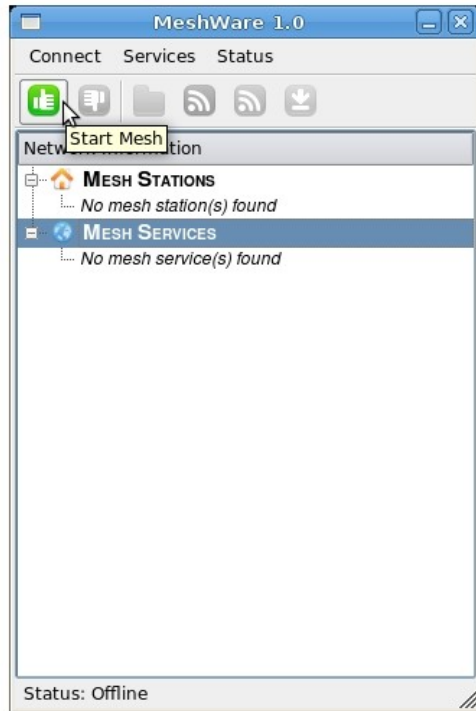
Sovelluksen idea muodostui jo aikaisessa vaiheessa ja *MeshWare* (kuva 16) kehitys aloitettiin melko pian verkon rakentamisen ja testauksen jälkeen. Ohjelma on toteutettu C++:lla ja graafinen käyttöliittymä Qt:lla. MeshWare mahdollistaa :

- Mesh-verkon luonnin tai olemassaolevaan verkkoon liittymisen.
- Verkon jäsenten ja palveluiden reaaliaikaisen selailun.
- Integroidun tiedostonsiirtopalvelun gFTP sovelluksella.
- Integroidun multimedian streamauksen VLC:n avulla unicastina verkon jäsenelle sekä multicastina koko verkkoon.



Kuva 16. MeshWare 1.0

Ohjelman käyttö on tehty mahdollisimman yksinkertaiseksi. Mesh-verkko käynnistetään hiiren klikkauksella (kuva 17). Tämän jälkeen valitaan käytettävä WLAN-sovitin (kuva 18), ja annetaan mesh-verkon nimi (kuva 19). Kuvassa 20 näkyy mesh-verkko jossa on 3 mesh asemaa sekä 2 palvelua laitteelle *petri*.



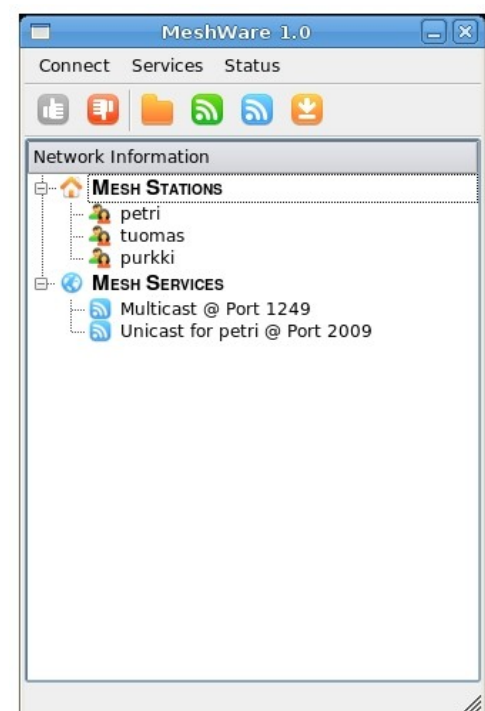
Kuva 17. Mesh-verkon käynnistys



Kuva 18. WLAN-sovittimen valinta



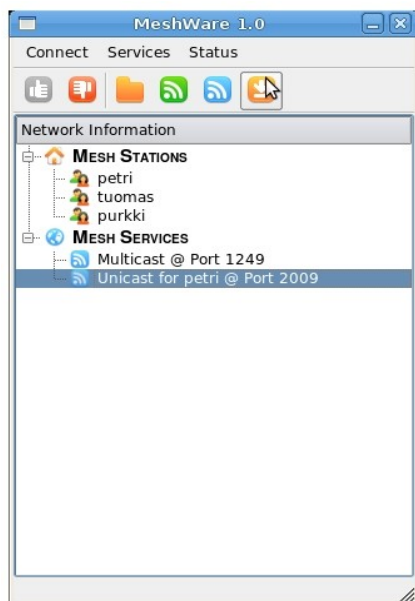
Kuva 19. Mesh-verkon valinta



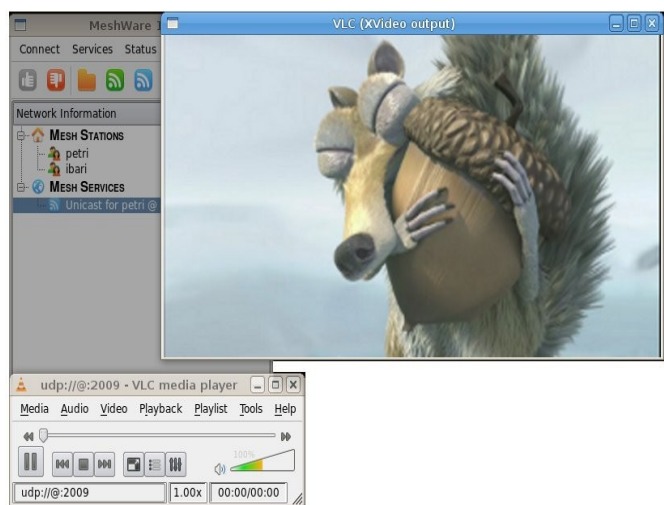
Kuva 20. Verkon laitteet ja palvelut

Palveluiden valinta ja luominen on tehty myös mahdollisimman yksinkertaiseksi.

Kuvassa 21 nähdään streamauksen vastaanottaminen. Haluttu streami valitaan listasta ja klikataan keltaista *receive stream* nappia. Streamin luominen tapahtuu valitsemalla kohdeasema ja klikkaamalla vihreää *send unicast stream* nappia. Multicast streami koko verkkoon luodaan sinisellä *send multicast stream* napilla. Multicast streamit näkyvät kaikille verkon laitteille ja unicast streamit vain niille kohdistetuille laitteille *Mesh Services*:n alla. Varsinainen streamaus hoidetaan erillisellä VLC media playerillä (kuva 22).

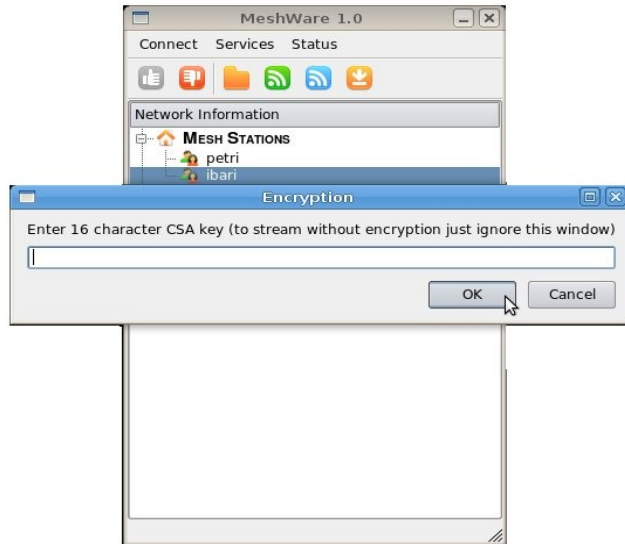


Kuva 21. Palveluiden valinta



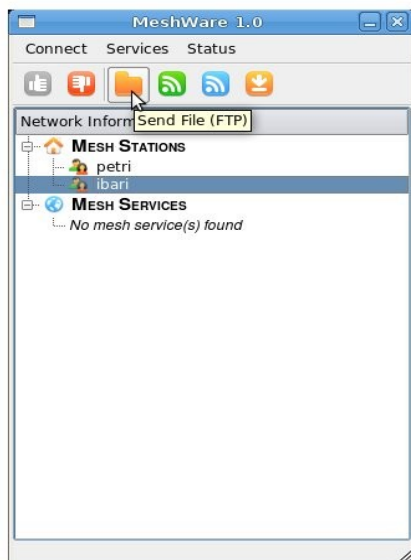
Kuva 22. Streamin vastaanotto

Streamauksessa on myös mahdollista käyttää VLC:n tukemaa *Common Scrambling Algorithm* (CSA) salausta (kuva 23). Tällöin streamiä lähetettäessä sekä vastaanottaessa on käytettävä identtistä 16 merkkistä salausavainta.



Kuva 23. Streamauksen CSA salaus

FTP palvelussa valitaan käyttäjä listasta ja klikataan *send file with FTP* nappia (kuva 24). Tämä avaa gFTP sovelluksen, jolla varsinainen tiedonsiirto tapahtuu.



Kuva 24. FTP palvelu

MeshWare on saatavissa lähdekoodeineen osoitteesta

<http://powerofmesh.demola.fi/wiki>